

Tema 1: Introducción.

1.1.- Los Sistemas de Potencia.

Cada vez son más los dispositivos y sistemas que en una o varias de sus etapas son accionados por energía eléctrica. Los accionamientos consisten, en general, en procesos que transforman la energía eléctrica en otro tipo de energía, o en el mismo tipo, pero con diferentes características. Los encargados de realizar dichos procesos son los **Sistemas de Potencia**.

Veamos en la siguiente figura una clasificación básica de los sistemas de potencia en función del proceso que realizan:

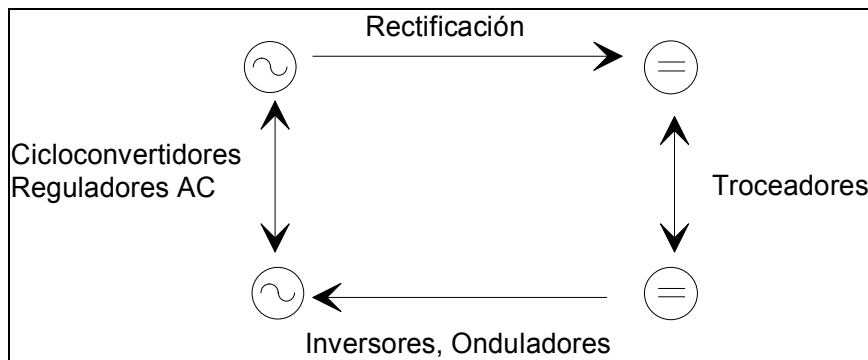


Figura 1.1.- Clasificación básica de los Sistemas de potencia.

Las aplicaciones de la electrónica estuvieron limitadas durante mucho tiempo a las técnicas de alta frecuencia (emisores, receptores, etc.). En la evolución de la electrónica industrial, las posibilidades estaban limitadas por la falta de fiabilidad de los elementos electrónicos entonces disponibles (tubos amplificadores, tiratrones, resistencias, condensadores). Esta fiabilidad era insuficiente para responder a las altas exigencias que se requerían en las nuevas aplicaciones del campo industrial.

Gracias al descubrimiento de los dispositivos semiconductores (transistores, tiristores, etc.) en la década de los 60, que respondían a las exigencias industriales (alta fiabilidad, dimensiones reducidas, insensibilidad a las vibraciones mecánicas, etc.), la electrónica industrial hizo progresos increíbles, permitiendo la realización de procesos cada vez más complejos, destinados a la automatización de procesos industriales.

En general, cualquier conversión de energía eléctrica se puede realizar por *procedimientos electromecánicos* o por *procedimientos electrónicos*. Los convertidores electrónicos disponen de las siguientes ventajas frente a los electromecánicos:

1. Mayor flexibilidad y más posibilidades de control.
2. Mayor estabilidad y rapidez de respuesta.
3. Menor mantenimiento al no disponer de partes mecánicas.
4. Mayor vida media y mayor fiabilidad.
5. No producción del arco eléctrico.

Como inconvenientes se pueden destacar:

1. Menor robustez eléctrica, al disponer de menor capacidad para soportar sobretensiones y sobrecorrientes.
2. Mayor coste para algunas de sus aplicaciones.

La mayor **flexibilidad** y **controlabilidad** de los dispositivos electrónicos, hace que se apliquen para resolver procesos cada vez más complejos. Un equipo electrónico de potencia consta fundamentalmente de dos partes, tal como se simboliza en la siguiente figura :

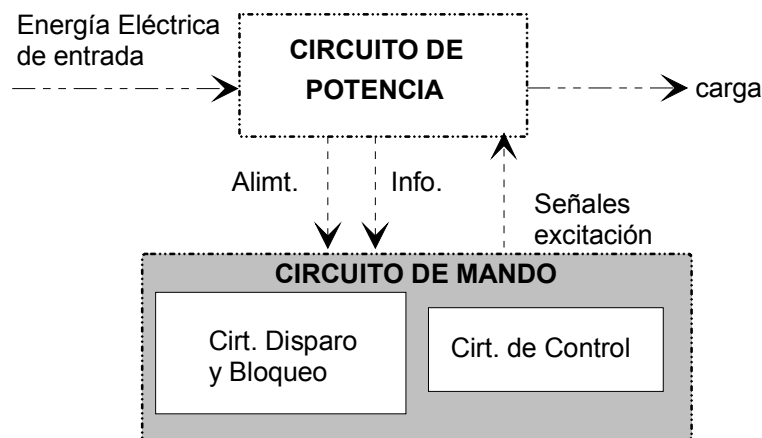


Figura 1.2.- Diagrama de bloques de un sistema de potencia.

1. Un circuito de Potencia, compuesto de semiconductores de potencia y elementos pasivos, que liga la fuente primaria de alimentación con la carga.
2. Un circuito de mando, que elabora la información proporcionada por el circuito de potencia y genera unas señales de excitación que determinan la conducción de los semiconductores controlados con una fase y secuencia conveniente.

Antes de pasar al estudio de la electrónica de potencia, interesa resaltar su principal característica, mostrar sus particularidades y situar el campo de aplicación.

En la *Electrónica de Señal* se varía la caída de tensión que un componente activo crea en un circuito habitualmente alimentado en continua. Esta variación permite, a partir de una información de entrada, obtener otra de salida modificada o amplificada. Lo que interesa es la relación entre las señales de entrada y salida, examinando posteriormente la potencia suministrada por la fuente auxiliar de corriente continua que requiere para su funcionamiento. La función de base es la **amplificación** y la principal característica es la **ganancia**.

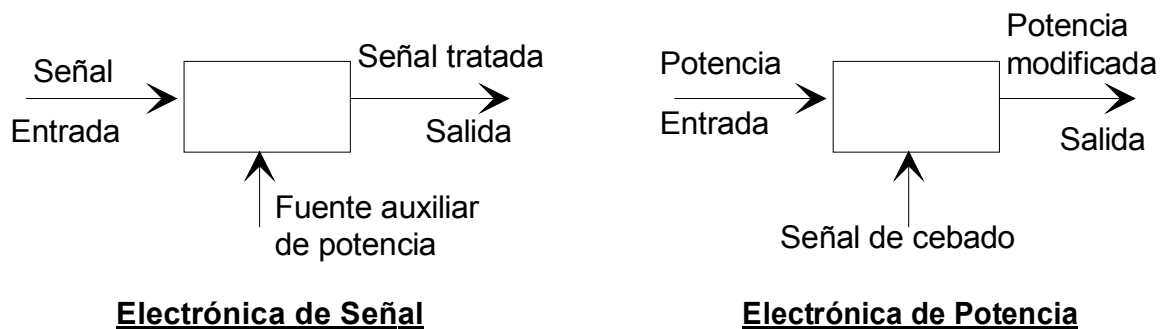


Figura 1.3.- Diferencia funcional básica entre la electrónica de señal y la de potencia.

En la *Electrónica de Potencia*, el concepto principal es el **rendimiento**. El elemento de base no puede trabajar en régimen de amplificación pues las pérdidas serían elevadas, es necesario trabajar en régimen de **conmutación**, siendo el componente de base el semiconductor quien trabaja como interruptor. Este componente trabajando en conmutación deberá cumplir las siguientes características:

- Tener dos estados claramente definidos, uno de alta impedancia (bloqueo) y otro de baja impedancia (conducción).
- Poder controlar el paso de un estado a otro con facilidad y con pequeña potencia de control.
- Ser capaz de soportar altas tensiones cuando está bloqueado y grandes intensidades, con pequeñas caídas de tensión entre sus extremos, cuando está en conducción.
- Rapidez de funcionamiento para pasar de un estado a otro.

1.2.- Los Convertidores de Alimentación.

En la mayoría de equipos electrónicos, se necesita una alimentación de tensiones continuas que permitan un funcionamiento del sistema. Existen algunos equipos portátiles y de bajo consumo, que utilizan pilas o baterías como fuentes de suministro primario, presentando el inconveniente de su agotamiento y de su elevado coste. Por tanto, existe la necesidad de utilizar fuentes primarias de energía que dependan de la tensión alterna de la red de distribución. En este caso necesitamos utilizar un sistema de potencia que transforme la energía alterna, de tensión y frecuencias fijas, en tensiones continuas específicas para cada aplicación. A este sistema electrónico se le conoce como **Convertidor o Fuente de Alimentación**.

En la siguiente figura se observa el diagrama de bloques de una fuente de alimentación, alimentada desde baterías o desde la red eléctrica.

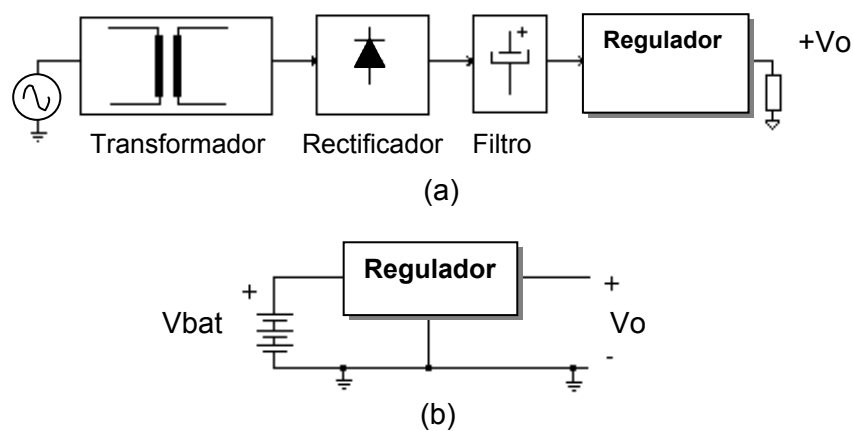


Figura 1.4. Diagrama de bloques de una fuente de alimentación.
(a) alimentada desde la red alterna, (b) alimentada desde batería.

Una vez se conoce si la fuente de alimentación debe conectarse, en la entrada, a una batería, o a la red eléctrica, existen diversas clasificaciones de los diferentes tipos de fuentes de alimentación. Se pueden clasificar en función de si **son regulados o no regulados**. Entendiendo por fuente de alimentación regulada, aquella que proporciona un desacople entre la fuente de alimentación primaria (no regulada) y el circuito de carga, de modo que la tensión de salida (corriente) sea independiente de las variaciones de la impedancia de carga, tensión de entrada y temperatura de funcionamiento.

Para apreciar las ventajas de los convertidores conmutados, es adecuado considerar inicialmente las fuentes de alimentación lineales. Una fuente de alimentación, se puede

considerar como un sistema electrónico que convierte potencia de línea AC en potencia DC, y realiza diversas funciones:

- **Transformación de tensión:** cambiar el nivel de tensión de línea AC en otro nivel más conveniente.
- **Rectificación:** cambio de AC a DC.
- **Filtrado:** alisa el rizado de la tensión rectificada.
- **Regulación:** controlar la tensión de salida para proporcionar un valor constante ante cambios de línea, carga y temperatura.
- **Aislamiento:** separación eléctrica entre la entrada y la salida de una fuente de alimentación.

Tal como se observa en la figura anterior 1.4, el primer bloque está constituido por un transformador, encargado de adaptar el nivel de tensión de la red eléctrica, al nivel de tensión del circuito, además de proveer un aislamiento galvánico entre la fuente primaria y la carga. Posteriormente aparece un bloque rectificador y una de filtrado, funciones que pasamos a describir a continuación.

1.2.1. Rectificación.

La función de rectificación y filtrado de la tensión alterna disponible en la entrada, junto con la de transformar el nivel de alterna disponible, constituye las principales funciones de la sección de entrada de las fuentes de alimentación.

La configuración del circuito rectificador dependerá de la línea de tensión disponible. Así para baja y media potencia estos circuitos se alimentan desde la red monofásica (220Veficaces fase-neutro, 50Hz), dejando la red trifásica (380Veficaces fase-fase) para los circuitos de alta potencia. Partiendo de la red monofásica los circuitos rectificadores pueden ser de tres tipos, principalmente: rectificadores de media onda, de onda completa con toma intermedia y de onda completa en configuración de puente. Veamos la primera de estas estructuras en la figura 1.5.

Es el montaje más simple, y únicamente utilizable para bajas potencias. El circuito básico y las formas de onda de su funcionamiento se muestran a continuación. El funcionamiento de dicho rectificador vendrá condicionado por el tipo de carga a la que este conectado.

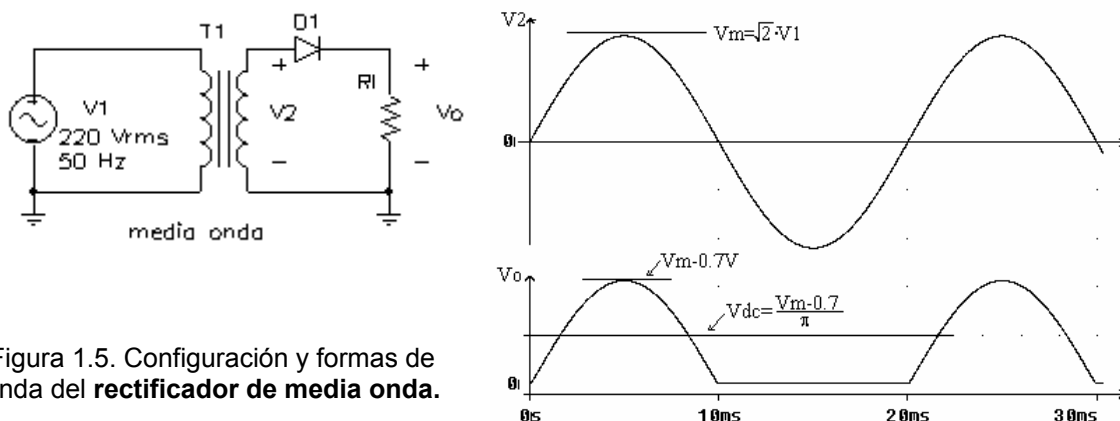


Figura 1.5. Configuración y formas de onda del **rectificador de media onda**.

La conducción del diodo se produce durante el intervalo $0 < \omega t < \pi$ ###, durante el cual la tensión $V_{ak} > 0$. Si el diodo es ideal, durante el semiciclo positivo la tensión de la entrada se aplicará directamente a la carga. No habiendo conducción durante el semiciclo negativo de $\pi < \omega t < 2\pi$ ###.

La tensión de salida rectificada tendrá por tanto la siguiente expresión:

$$v_o(t) = \begin{cases} V_m \cdot \sin(\omega t) & 0 \leq \omega t \leq \pi \\ 0 & \pi \leq \omega t \leq 2\pi \end{cases}$$

con un valor medio igual a : $U_{d0} = \frac{V_m}{\pi}$ y un valor eficaz o rms de : $U_{d-ef} = \frac{V_m}{2}$

Para tener referencia de la calidad de la señal rectificada podemos calcular los siguientes parámetros:

Factor de forma :

$$f_F = \frac{U_{RMS}}{U_{d0}} = \frac{\pi}{2} = 1.57$$

Rizado de la señal rectificada :

$$r = \frac{U_{RMS-ac}}{U_{d0}} = \left(\sqrt{(f_F)^2 - 1} \right) \cdot 100 = 121\%$$

donde se observa que la situación ideal de los rectificadores sería obtener un factor de forma unidad y un rizado nulo.

Tensión inversa máxima : $V_{RRM} = V_m$

Corriente máxima : $I_{m\acute{a}x} = \frac{V_m - 0.7}{R_L}$

La simplicidad de este rectificador no compensa sus principales desventajas, de las que destacan su dificultad para ser filtrada, debido a su gran rizado en la tensión de salida, dado que solo aplica a la carga un semiciclo de la tensión de entrada, junto con la corriente en el secundario del transformador que es unidireccional, lo que representa un bajo rendimiento en la utilización del transformador, además de la existencia de una componente de continua que puede llegar a provocar la saturación del núcleo magnético y la deformación de la tensión en secundario.

Los dos siguientes rectificadores vienen a mejorar la calidad de la tensión rectificada, obteniendo dos semiciclos positivos de la tensión de entrada sobre la carga del secundario. A partir de la red monofásica se puede obtener un sistema bifásico, es decir, dos tensiones iguales y desfasadas $\pi/2$, gracias a un transformador con toma intermedia. El montaje que rectifica estas dos tensiones es el que se muestra a continuación, siendo también conocido como **rectificador monofásico de doble onda con toma intermedia**.

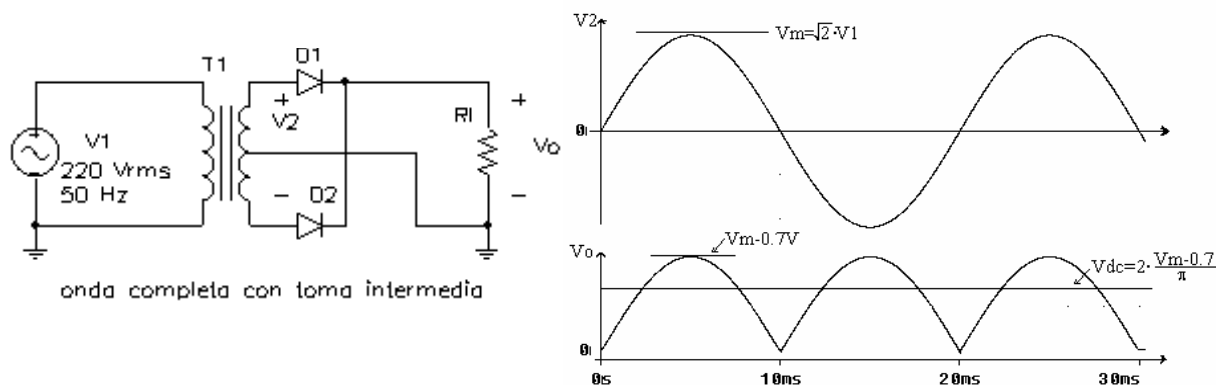


Figura 1.6. Configuración y formas de onda del rectificador de onda completa

La expresión de la tensión a la salida será:

$$v_o(t) = \begin{cases} V_m \cdot \sin(\omega t) & 0 < \omega t < \pi \\ V_m \cdot \sin(\omega t) & \pi < \omega t < 2\pi \end{cases}$$

con un valor medio $U_{d0} = \frac{2 \cdot V_m}{\pi}$ y un valor eficaz $U_{d-ef} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$

obteniendo los siguientes factores que nos permitirán compararlo con los demás montajes rectificadores:

Factor de forma :

$$f_F = \frac{U_{RMS}}{U_{d0}} = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} = 1.11$$

Rizado de la señal rectificada :

$$r = \left(\sqrt{(f_F)^2 - 1} \right) \cdot 100 = 48.34 \%$$

Cabe destacar como este tipo de rectificador proporciona una tensión de salida con un rizado de alterna al doble de la frecuencia de red, lo cual implica la necesidad de un filtro de menor tamaño. Los inconvenientes de este rectificador residen en la utilización de un transformador con toma intermedia, además de la elevada tensión inversa que deben soportar los diodos rectificadores ($V_{RMM} = 2 V_m - 0.7V$).

Por último **la configuración de onda completa en puente** proporciona, sin la necesidad de toma intermedia en el secundario del transformador, una tensión de igual calidad que el montaje anterior, con la diferencia de utilizar cuatro diodos rectificadores, así como que cada diodo soporte una tensión inversa $V_{RM} = V_m - 0.7V$. Veamos a continuación su configuración y formas de onda:

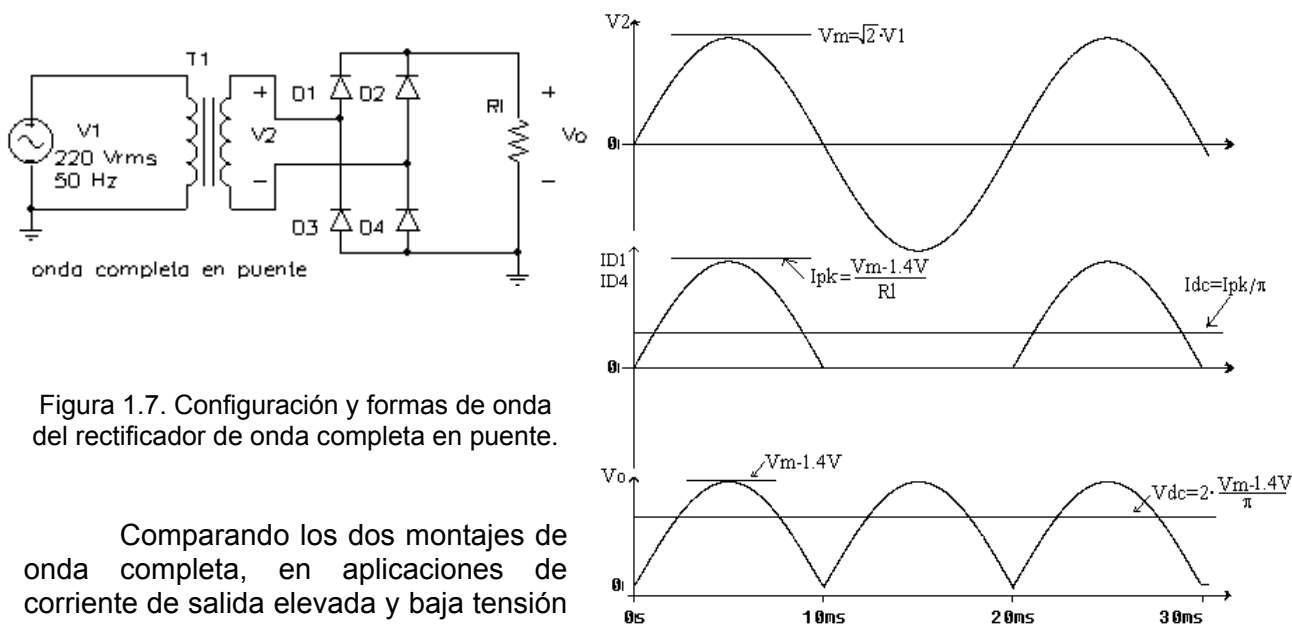


Figura 1.7. Configuración y formas de onda del rectificador de onda completa en puente.

Comparando los dos montajes de onda completa, en aplicaciones de corriente de salida elevada y baja tensión de salida, se utilizará el montaje con toma intermedia, al tener que restar a la tensión de salida la tensión de conducción directa ($V_F \approx 0.7V$) de un solo diodo, dejando la configuración en puente completo para las demás aplicaciones de corriente elevada. Desde el punto de vista del transformador, el secundario se utiliza mucho menos en el montaje de dos diodos que en el de puente, pues cada arrollamiento del secundario solo trabaja durante un semiciclo.

1.2.2. Filtrado.

Después de la rectificación de la tensión alterna, necesitamos eliminar la componente alterna de la tensión ondulada que hemos obtenido. Para ello debemos colocar un filtro con

una frecuencia de corte menor que la frecuencia fundamental de la tensión ondulada (montaje de media onda → Ffundamental=50Hz, montaje onda completa → Ffundamental=100Hz).

Para ello podemos utilizar diversas configuraciones de filtros: filtro capacitivo, filtro inductivo o filtros mixtos. A continuación expondremos el funcionamiento y diseño del filtrado capacitivo, dado que representa la manera más elemental de filtrar.

Para entender su funcionamiento, observemos la figura 1.8, donde se muestra la tensión de salida rectificada, para un rectificador de onda completa y filtro capacitivo.

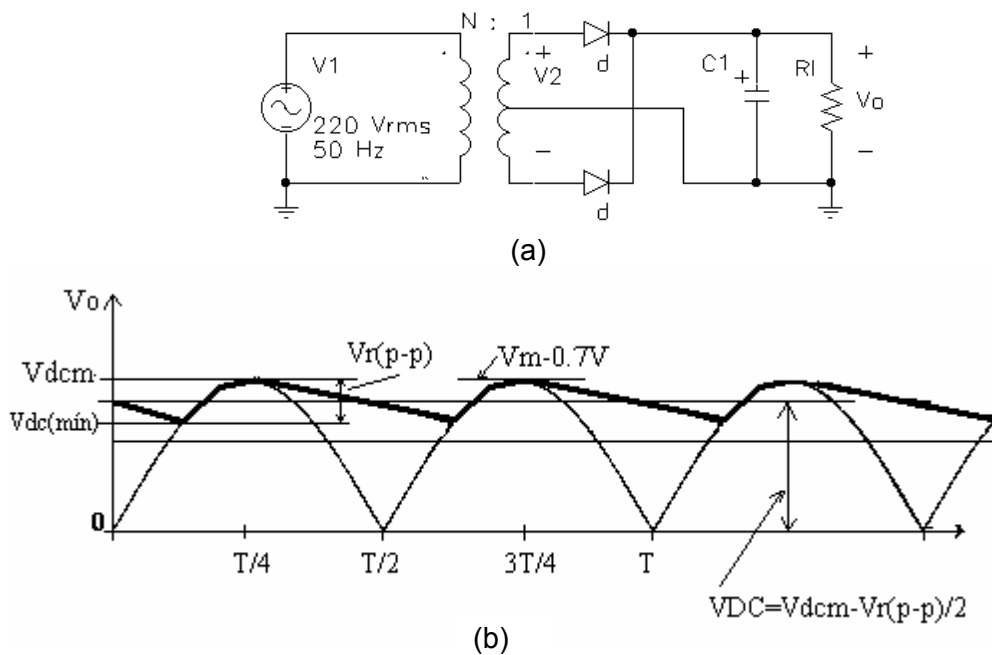


Figura 1.8. (a) Circuito rectificador con filtro de salida capacitivo.
 (b) Forma de tensión a la salida del rectificador de onda completa con filtro capacitivo.

El condensador C1 de la figura 1.8 suele ser un condensador electrolítico de aluminio, dada su característica de gran valor de capacidad en un tamaño reducido, así como tendencia de filtrado a bajas frecuencias.

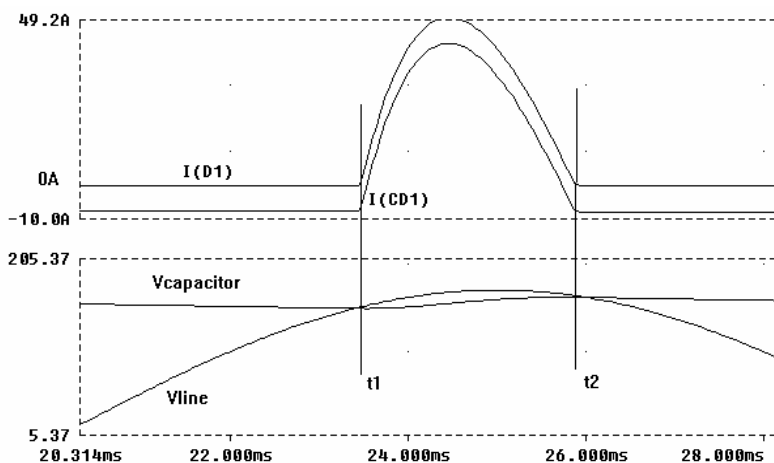


Figura 1.9. Zoom del instante de carga del condensador de filtrado.

Para entender con más detalle su funcionamiento fijémonos en un zoom donde se muestra la diferencia entre el pico de la tensión de entrada y la tensión de carga del condensador (figura 1.9). Cuando la tensión aplicada al rectificador excede la tensión del condensador, instante t1, los diodos rectificadores se polarizan directamente proporcionando corriente desde la entrada hacia la salida y a la carga del condensador. Después en t2, la tensión aplicada cae por debajo

del voltaje del condensador, bloqueando la conducción de los diodos, de forma que la corriente de la entrada se hace cero. De esta manera hasta que en el nuevo semiciclo, la tensión no

supere de nuevo la tensión del condensador es el condensador quien proporciona la corriente de carga.

Cabe destacar como el pico de tensión máxima en el condensador es menor que el pico de la tensión de entrada, debido a la tensión de caída directa en los diodos rectificadores y a una posible resistencia debido a la propia resistencia de la línea, a los fusibles y a los diodos.

La energía que almacena el condensador de entrada cada semiciclo de línea será:

$$\frac{W_{in}}{2} = \frac{C_{in} \cdot (V_{dcm}^2 - V_{dc(min)}^2)}{2}, \text{ donde } W_{in} = \frac{P_{in}}{f_{line}}$$

$$\text{obteniendose } \Rightarrow C_{in} = \frac{P_{output}}{\eta \cdot f_{line} \cdot (V_{dcm}^2 - V_{dc(min)}^2)}$$

donde conociendo la potencia máxima que nos debe proporcionar el postregulador que coloquemos, o bien la máxima potencia que consumirá la carga conectada a este rectificador (Pout), junto con establecer la tensión de rizado máxima (Vr(p-p)=Vdcm-Vdc(mín)), podemos calcular la capacidad mínima necesaria.

Para seleccionar perfectamente el condensador, fijemos su tensión máxima con un 20% por encima de la tensión de salida del rectificador (1.2·Vdcm), quedando por calcular la corriente alterna de rizado en el mismo. Ahora podemos calcular la corriente de carga del condensador, conociendo el tiempo de carga tc (en la figura 1.9 tc = t2-t1):

$$V_{dc(min)} = V_{dcm} \cdot \sin(\omega \cdot tx) = V_{dcm} \cdot \cos(-\omega \cdot tc) = V_{dcm} \cdot \cos(\omega \cdot tc)$$

$$V_{dc(min)} = V_{dcm} \cdot \cos(2\pi \cdot f_{line} \cdot tc) \Rightarrow tc = \frac{\cos^{-1}\left(\frac{V_{dc(min)}}{V_{dcm}}\right)}{2\pi \cdot f_{line}}$$

Por simplificar el cálculo, asumiremos una corriente pulsante rectangular de carga, con un pico constante durante tc igual a ichg, tal como se muestra a continuación:

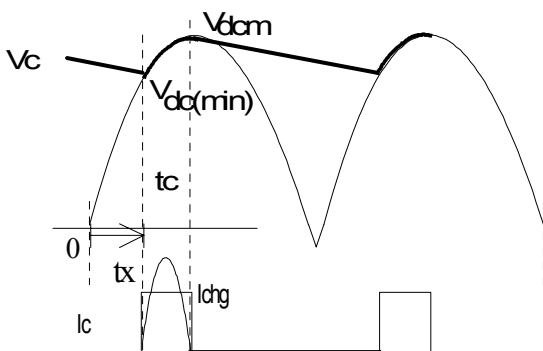


Figura 1.10. Formas de onda ideales para el cálculo de la corriente de carga del condensador

$$\Delta Q = i_{chg} \cdot \Delta t = C \cdot \Delta V$$

$$\text{de donde } i_{chg} = C \cdot (V_{dcm} - V_{dc(min)}) / tc$$

La componente RMS AC de la carga del condensador, Ichg, es conducida por el condensador contribuyendo a su calentamiento debido a la ESR, debiendo ser lo más pequeña posible.

$$I_{chg-AC} = \sqrt{I_{CHG}^2 - I_{DC}^2} = \sqrt{\left(i_{chg}^2 \cdot \frac{tc}{T/2}\right) - i_{chg}^2 \left(\frac{tc}{T/2}\right)^2} = i_{chg} \cdot \sqrt{tc \cdot 2 \cdot f_{line} - (tc \cdot 2 \cdot f_{line})^2}$$

Respecto de la configuración de media onda el proceso es equivalente, con la diferencia de que el condensador de carga cada ciclo de red, a diferencia de la configuración de onda completa donde se carga cada semiperíodo. Así la capacidad necesaria será:

$$\text{obteniéndose} \Rightarrow C_{in} = \frac{2P_{output}}{\eta \cdot f_{line} \cdot (V_{dcm}^2 - V_{dc(mín)}^2)}$$

Calculemos ahora la corriente de carga de los condensadores asumiendo unos pulsos rectangulares de carga del condensador:

$$\text{siendo la corriente RMS en cada condensador: } I_{chg} = i_{chg} \cdot \sqrt{(tc \cdot f_{line})^2 - (tc \cdot f_{line})^2}$$

De acuerdo con el modo de funcionamiento, descrito en los apartados anteriores, a la hora de seleccionar el condensador adecuado deberemos atender a los siguientes factores:

- ❶ Corriente RMS.
- ❷ Rizado de Tensión.
- ❸ Tensión máxima que debe soportar.
- ❹ Tamaño y Coste.

Hasta ahora hemos analizado el funcionamiento de los bloques que constituirían una **fuentes de alimentación no regulada** (transformador + rectificador + filtro), pues variaciones de la tensión senoidal de entrada al transformador implicarían variaciones de la tensión filtrada de la salida, junto con la dependencia del rizado de la tensión de salida con la relación de la resistencia de carga, pues es quien define la constante de descarga del condensador. Veamos ahora los sistemas que introducen como característica fundamental la regulación de la tensión que proporcionan.

1.3. Fuentes de alimentación reguladas.

El propósito principal de añadir un sistema de regulación reside en obtener una regulación de línea y de carga adecuadas, entendiéndose por **regulación de línea** la máxima desviación de la tensión de salida respecto a su valor nominal para variaciones de la tensión de entrada entre sus valores extremos con máxima carga.

$$RL[\%] = \frac{|V_0(input_máx) - V_0(input_mín)|}{V_{0nom}} \times 100$$

Y por **regulación de carga** la diferencia entre la medida de V_0 para máxima carga y V_0 para circuito abierto, o para la mínima carga especificada en el convertidor, siempre bajo condiciones de V_{INPUT} nominal.

$$RC[\%] = \frac{|V_0(RLmax) - V_0(RLmin)|}{V_{0nom}} \times 100$$

Antes de comenzar con el detalle de dichas fuentes de alimentación, cabe distinguir entre las fuentes estabilizadas y las reguladas. Así entenderemos por **estabilizador de tensión** a todo dispositivo capaz de proporcionar una tensión de salida estable ante variaciones de entrada y/o de la carga, utilizando únicamente las propiedades de elementos de característica no lineal, (tales como los diodos zener o las resistencias con coeficiente de temperatura negativo o positivo) sin que intervenga ningún circuito de realimentación. Siendo el **regulador de tensión** todo dispositivo donde la magnitud a regular es comparada permanentemente con una magnitud de referencia, resultado del cual, la magnitud de error entre ellas sirve para ajustar las características internas del regulador de forma que se adecue

la salida al nivel fijado ante variaciones de entrada y/o carga, lo cual representa un sistema realimentado.

1.3.1. Estabilización de tensión.

Representan circuitos simples capaces de mantener la tensión en los bornes de la carga constante cuando la tensión de alimentación y/o el suministro de corriente varían en proporciones considerables, utilizando la característica no lineal de algún componente.

Como circuito más simple empezamos por el estabilizador por diodo zener. La siguiente figura muestra la configuración de este estabilizador, donde se polarizará inversamente el zener para fijar la tensión en la carga, aprovechando la característica del zener.

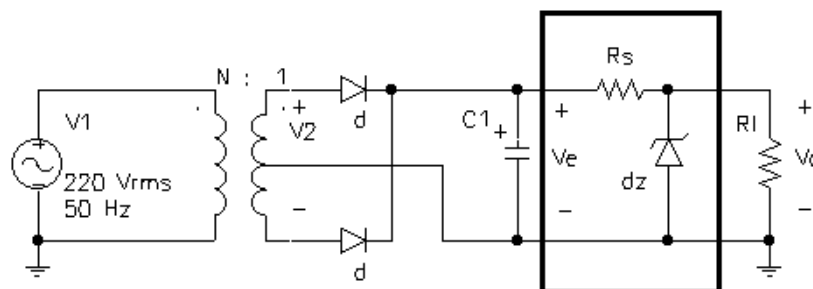


Figura 1.11. Esquema básico de una fuente de tensión estabilizada por diodo zener

Para realizar su diseño, debemos fijar la tensión mínima admisible en la entrada ($V_{e\text{mín}}$), la corriente en la carga y la temperatura de funcionamiento.

En primer lugar se calcula la resistencia R_s , donde la caída de tensión entre sus bornes es igual a la diferencia entre la tensión mínima de entrada y la tensión del zener.

$$R_s = \frac{V_{e,\text{mín}} - V_Z}{I_{RL}(\text{máx}) + I_{Z\text{mín}}} \approx \frac{V_{e,\text{mín}} - V_Z}{1.2 \cdot I_{RL}(\text{máx})} \quad \text{con una potencia} \quad P_{R_s} = \frac{(V_{e,\text{máx}} - V_Z)^2}{R_s}$$

Donde se ha considerado que la corriente del zener debe sea al menos igual al 10-20% de la carga. Y a continuación calculamos la potencia disipada en el estabilizador:

$$P_{\text{zener}} = \left(\frac{V_{e,\text{máx}} - V_Z}{R_s} - I_{RL}(\text{mín}) \right) \cdot V_Z$$

Las limitaciones de esta configuración residen en la variación de la corriente del zener, y por tanto su tensión, para diferentes corrientes de la carga y para diferentes temperaturas de funcionamiento, junto con la disipación del zener, la cual aumenta al decrecer la corriente en la carga. Para mejorar las prestaciones de esta configuración podemos asociar al diodo zener con un transistor en una configuración serie o paralelo, para disminuir la potencia a disipar en el diodo y entregar más corriente a la carga. Dichos montajes se muestran en la siguiente figura.

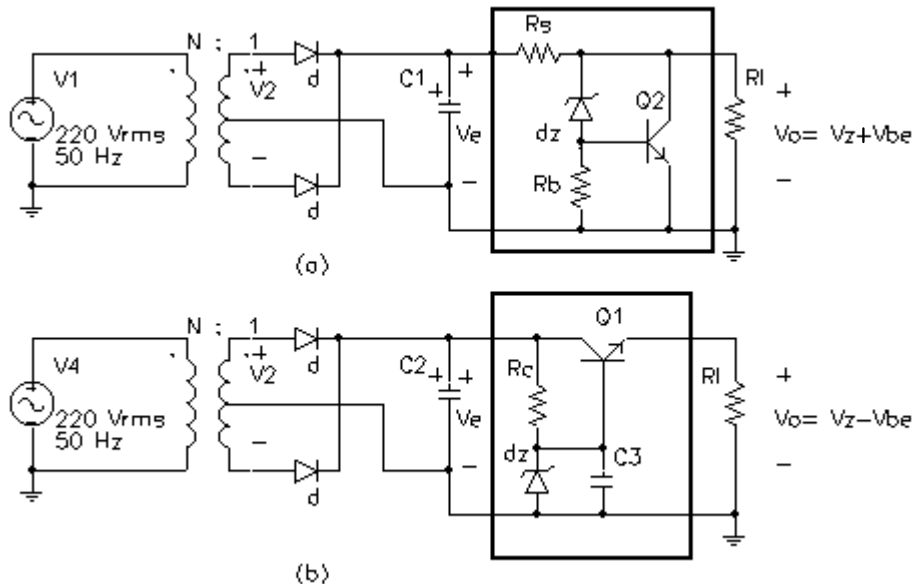


Figura 1.12. Montajes estabilizadores paralelo (a) y serie (b).

Para el diseño de la **configuración paralelo**, escogeremos un diodo zener con una tensión característica $V_z = V_o_{\text{nominal}} - V_{be}$, calculando R_s y el transistor de la siguiente manera:

$$R_s = \frac{V_{e, \text{mín}} - V_o}{1.1 \cdot I_{c \text{ máx}}} \quad \text{con una potencia} \quad P_{R_s} = \frac{(V_{e \text{ máx}} - V_o)^2}{R_s}, \quad \text{siendo } I_c \text{ la corriente de carga}$$

$$\text{y con una potencia disipada en el transistor igual a: } P_{Tr} = \left(\frac{V_{e \text{ máx}} - V_o}{R_s} - I_{RL}(\text{mín}) \right) \cdot V_o$$

La ventaja de este montaje es la independencia de la carga sobre la tensión de alimentación suministrada por la fuente, dado que requiere como alimentación una corriente prácticamente constante. Sin embargo, el rendimiento a pequeñas cargas es malo ya que la corriente que no es absorbida por la carga lo es por el transistor de estabilización.

Respecto al **montaje serie** (Figura 1.12 b) aun con un rendimiento superior con cargas pequeñas, debido a que el transistor está recorrido por la misma corriente que la carga, este montaje presentará peor estabilización en función de la carga. Por el contrario añadiendo el condensador C3 en paralelo al zener, se mejorará notablemente el filtrado pues la impedancia de salida del estabilizador es $1/(j\omega h_{FE} C3)$, de manera que la capacidad efectiva a la salida resulta ser C3 multiplicado por la beta del transistor.

En cuanto a la influencia con la temperatura, en el montaje paralelo, la tensión V_{be} del transistor se añade a la tensión del zener V_z , cuyas variaciones en función de la temperatura son de signo positivo, contrario a las de V_{be} que son negativas, dando lugar a una cierta compensación. En el montaje serie, como la tensión V_{be} se resta de V_z , ocurre lo contrario, sumándose las dos variaciones.

1.3.2. Reguladores de tensión.

El principio básico de funcionamiento de todos los reguladores consiste en un esquema clásico de un automatismo, formado por una tensión de referencia o consigna, un amplificador de error y un elemento de control. Este esquema básico se muestra a continuación:

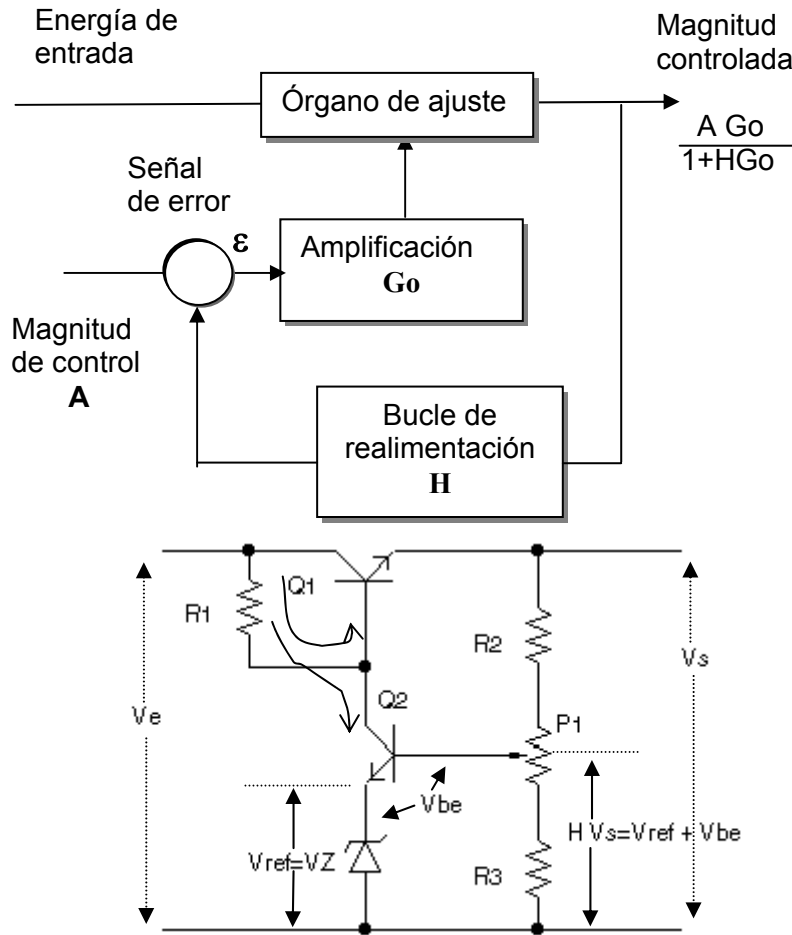


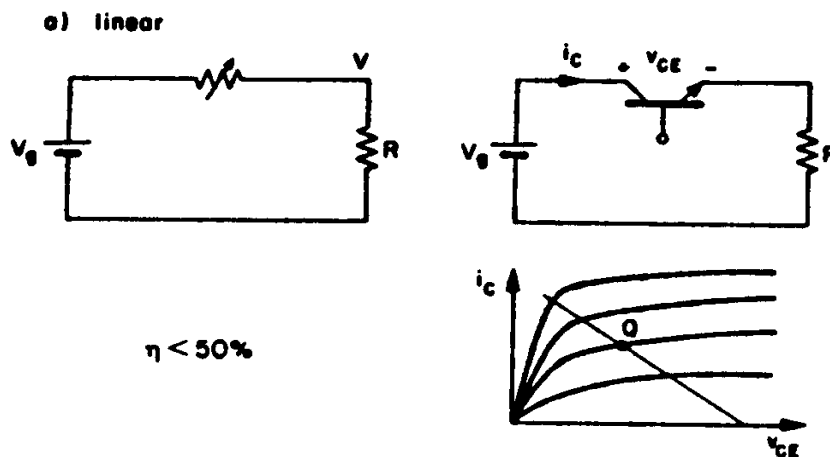
Figura 1.13. Diagrama de bloques y esquema básico de un regulador de tensión

Comparando el esquema básico mostrado en la figura anterior con el diagrama de un sistema realimentado, el transistor Q2 realiza el papel de comparación y amplificación, siendo la tensión del zener quien representa la referencia o magnitud de control.

Las fuentes de alimentación reguladas pueden dividirse en dos categorías, en función de si sus elementos activos trabajan en la **zona lineal** de sus características o si trabajan en **régimen de conmutación**, con dos estados definidos: corte o saturación. Siendo estas categorías:

Reguladores Lineales.

Reguladores Conmutados.



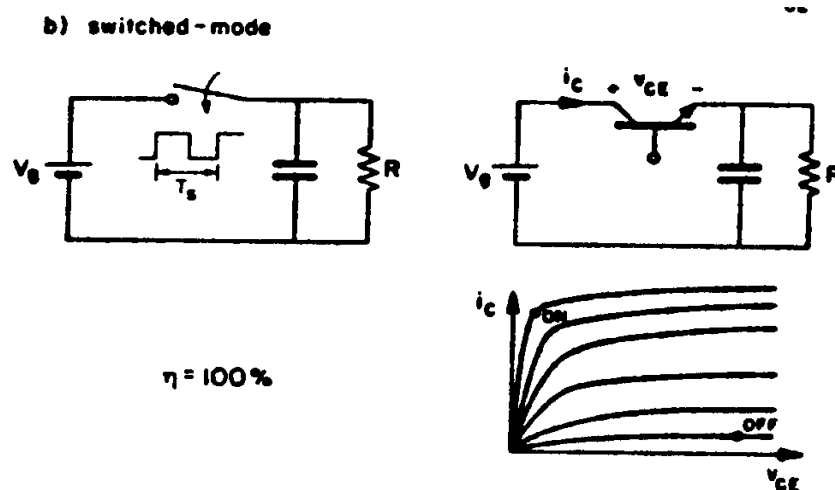


Figura 1.14. Diferencia básica entre los reguladores lineales y conmutados.

1.4.- Reguladores lineales.

La estructura básica de un regulador o fuente de alimentación lineal se muestra en la siguiente figura. Donde como bloque regulador nos encontramos a un transistor trabajando en la zona lineal, junto con un bucle de realimentación que sea capaz de regular el sistema.

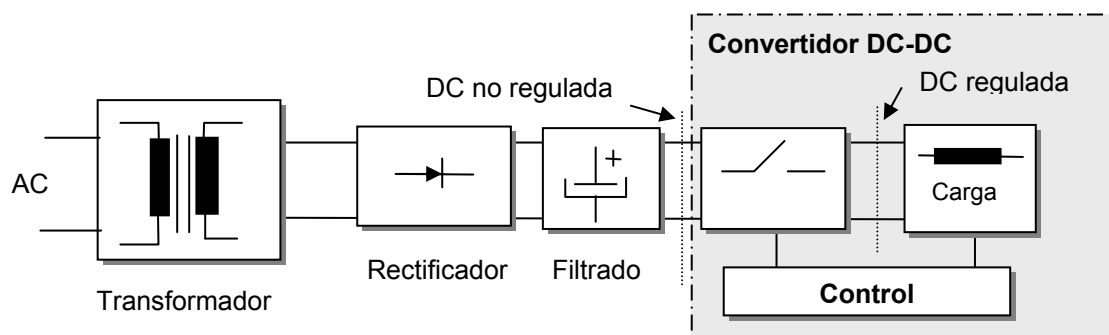


Figura 1.15. Diagrama de bloques de una fuente de alimentación o regulador lineal.

En estos sistemas el control actúa ajustando la “resistencia” que presenta el elemento de control, de manera que se varíe para mantener la tensión de salida constante. En realidad el elemento de control suele ser un transistor funcionando en modo lineal (Clase A), de ahí el nombre de reguladores lineales. Dependiendo de la forma de trabajar el elemento de control existen reguladores:

- SERIE
- PARALELO

Veamos a continuación la implementación de un **regulador lineal tipo serie**.

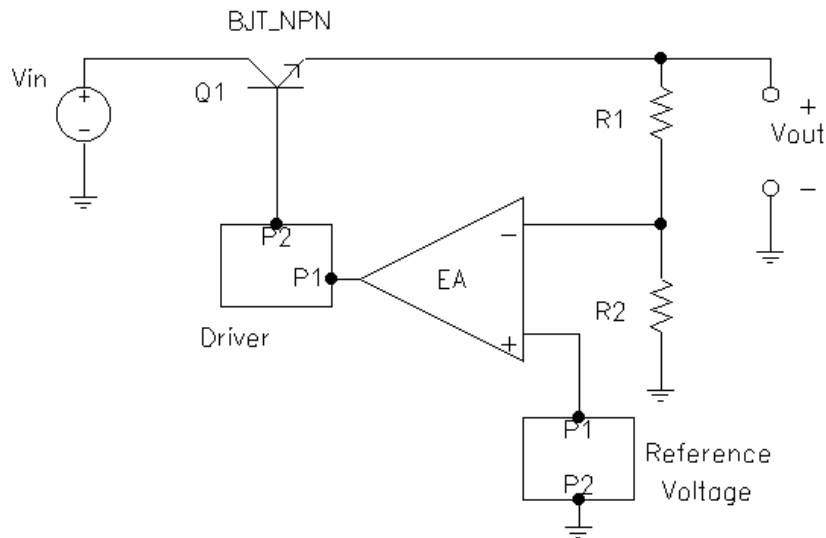


Figura 1.16. Configuración del regulador lineal serie.

Este tipo de regulador consiste esencialmente en una resistencia variable en forma de transistor funcionando en modo lineal en serie con la carga. El amplificador de error mide la tensión de salida mediante el divisor R1R2 y la compara con $V_{\text{referencia}}$. La tensión de salida es regulada mediante la modulación de la conducción del transistor bipolar. La tensión de salida regulada es igual a:

$$V_{\text{out}} = V_{\text{ref}} \cdot \left(1 + \frac{R1}{R2} \right)$$

Esta última expresión corresponde a un amplificador operacional no inversor considerando al transistor ideal. Un cambio en la tensión de entrada representa un cambio en la resistencia equivalente, R_s , del transistor serie, tal como se deduce a continuación. El producto de esta resistencia por la corriente de carga (I_{carga}) crea un cambio de la tensión diferencial, V_{dif} , que compensa el cambio de la tensión de entrada.

$$V_{\text{dif}} = V_{\text{in}} - V_{\text{out}} = I_{\text{load}} \cdot R_s$$

Así ante un cambio de la tensión de entrada el transistor serie será quien lo absorba. La estabilidad de la tensión de salida está determinada principalmente por la ganancia en lazo abierto del amplificador de error.

Este tipo de regulador representa una estructura simple y económica de obtener una fuente de tensión regulada. Sin embargo presenta dos claras limitaciones:

- Tensión de salida siempre menor que la de la entrada
- Excesiva disipación de potencia en el elemento de control para aplicaciones de media potencia.

$$P_{\text{dis}} = (V_{\text{in}} - V_{\text{out}}) \cdot I_{\text{load}}$$

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{V_{\text{out}} \cdot I_{\text{load}}}{V_{\text{in}} \cdot I_{\text{load}}} = \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}}$$

Veamos a continuación la implementación de un **regulador lineal tipo paralelo**.

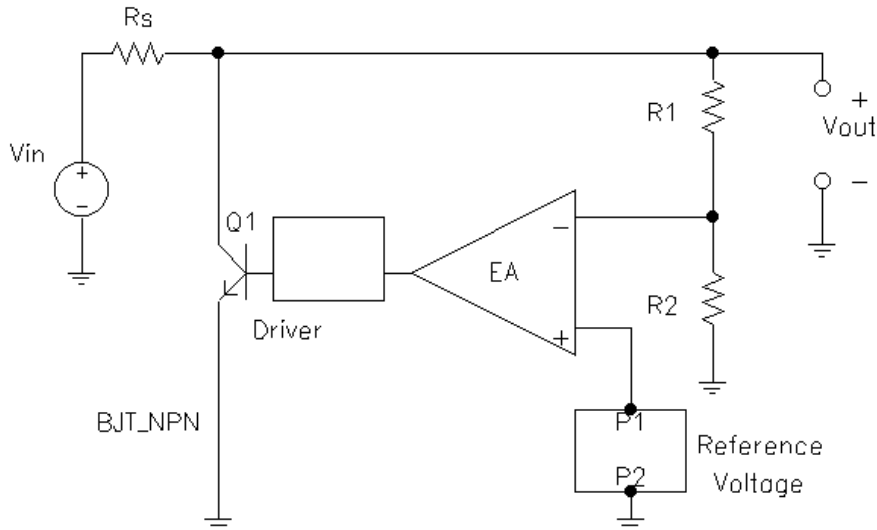


Figura 1.17. Configuración del regulador lineal paralelo.

En este caso se emplea un transistor en paralelo, de manera que varíe su corriente de acuerdo a las variaciones de V_{in} o de la condición de carga. La tensión de la salida será igual a:

$$V_{out} = V_{in} - (I_{load} + I_{CQ1}) \cdot R_s$$

El elemento regulador absorbe la máxima corriente cuando la carga es mínima y viceversa, siendo relativamente constante la corriente total de entrada a través de R_s . Es esta resistencia quien soporta las variaciones de la tensión de entrada. A diferencia del regulador serie, donde no se poseía una protección natural contra cortocircuitos en la salida, ahora la resistencia R_s actúa como elemento limitador de corriente en caso de cortocircuito, evitando que se destruya el elemento regulador.

En la configuración del regulador serie, no se aislaba la corriente de carga de la fuente primaria, ahora en el paralelo se impide que las variaciones de la corriente de carga aparezcan en la fuente primaria, logrando un aislamiento.

El rendimiento de este regulador es igual a:

$$\eta = \frac{V_o \cdot I_{carga}}{V_{in} \cdot (I_{carga} + I_{CQ1})} = \frac{I_{carga}}{I_{carga} + I_{CQ1}} - \frac{I_{carga} \cdot R_s}{V_{in}}$$

Tal como se observa de la ecuación anterior, el rendimiento decrece con el aumento de R_s y de I_{CQ1} .

Destacar que hemos representado los reguladores lineales utilizando amplificadores operacionales como amplificadores de error, lo cual permite obtener mayor precisión en la regulación de la tensión de salida.

Dado el peor rendimiento energético de los reguladores lineales paralelo, veamos unas pautas de diseño para el regulador lineal serie:

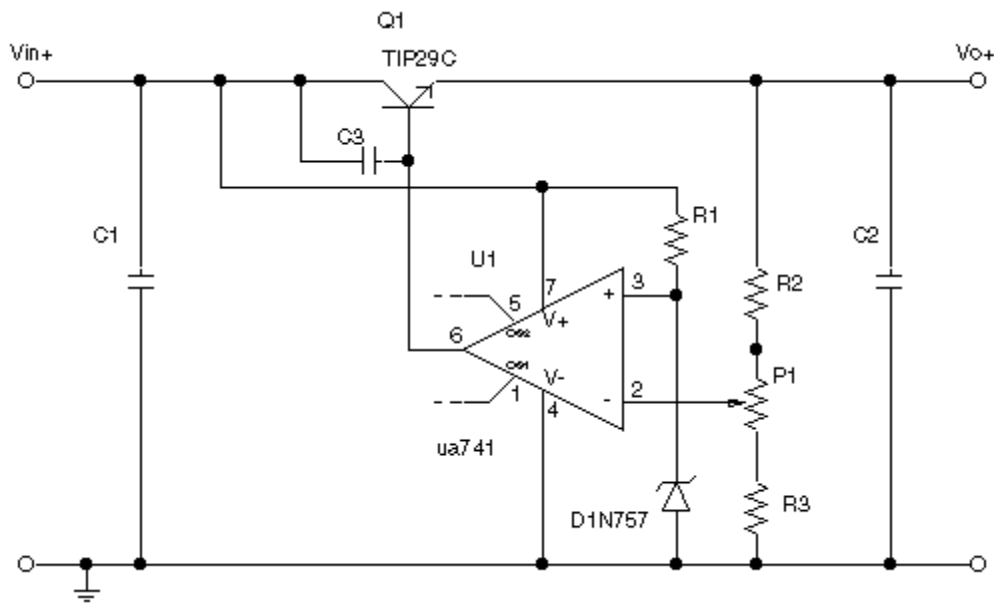


Figura 1.18. Configuración del regulador lineal serie utilizando un OPAM.

Para el correcto funcionamiento del circuito y dado que el amplificador de error está alimentado directamente desde la tensión de entrada (salida del rectificador), filtrada por C1, se deberán cumplir :

- $V_{dcm} < V_{opam\ máx}$ [para el 741 $(V_+) - (V_-) = 36V$]
- $V_{dc(mín)} > V_o + 2.7V$ [Se debe evitar la saturación del OPAM, pues si no se pierde la regulación de la tensión. Así la $V_{entrada-mín}$ debe ser 2V mayor que V_o evitando la saturación y otros 0.7V más para mantener a Q1 directamente polarizado.
- $h_{FE(mín)} > I_{o_máx} / I_{OPAM\ MAX}$. El OPAM debe proporcionar la corriente de base necesaria.
- $P_{TR} = V_{CE} I_C \cong (V_i - V_o) I_o$ Expresión de la máx. potencia a disipar por el transistor. Normalmente se requerirá de un radiador para evacuar dicha potencia (se transforma en calor).
- La tensión de referencia obtenida con el zener será conveniente referirla a la salida, pues será más estable al estar referida a una tensión regulada.
- Se puede añadir un condensador ($C3 \cong 1nF$) entre el colector y la base del transistor Q1. De esta manera al arrancar el circuito, C3 actúa como un cortocircuito para proporcionar corriente de base inicial a Q1.

1.4.1. Reguladores de Tensión Integrados.

Una vez analizadas las configuraciones discretas de reguladores lineales, hay que destacar la disponibilidad comercial de reguladores lineales monolíticos de relativo bajo coste, muy eficaces para aplicaciones de baja potencia. Dada su popular utilización, existen una amplia diversidad de tipos. La mejor fuente de información para conocer las diversas posibilidades son los catálogos de los fabricantes.

Aún conociendo la amplia diversidad, podemos clasificarlos en cinco tipos básicos de reguladores lineales, en función del tipo de tensión que obtengan así como de la configuración de cada montaje particular, así podemos agruparlos en:

1. Positivos
2. Negativos
3. Salida fija
4. Simétricos (tracking)
5. Flotantes

Destaquemos algunas de las familias más populares:

El regulador 723.

Este clásico regulador, introducido en la década de los 60, se consolidó como un estándar industrial, comercializado por los principales fabricantes de circuitos integrados. Se caracteriza por proporcionar una corriente de 150mA sin transistor externo, una regulación de línea de 0,02% y una regulación de carga de 0,03%. Puede funcionar proporcionando tensión positiva o negativa, en configuración serie, paralelo, flotante o conmutada. El diagrama de bloques se muestra en la siguiente figura, donde se puede distinguir los principales bloques que constituyen a la mayoría de reguladores integrados. Así dispone de una tensión de referencia, un amplificador de error y el transistor regulador, más las funciones adicionales de fuente de corriente necesaria para el funcionamiento de la fuente de referencia, el amplificador de error y un circuito de limitación de corriente para la protección del transistor regulador.

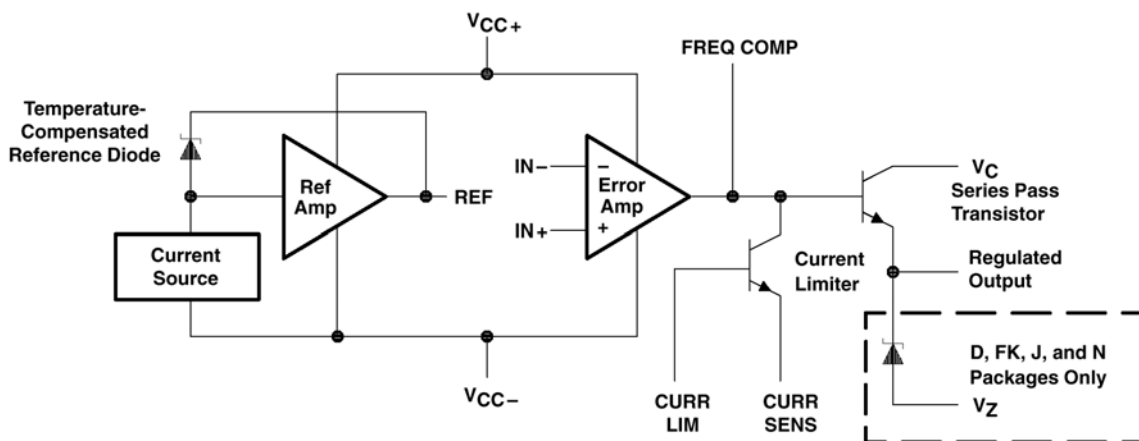


Figura 1.19. Esquema sinóptico del regulador integrado uA723. (Cortesía de Texas Instrument)

Las aplicaciones, con las diferentes configuraciones, de estos reguladores son muy numerosas, lo cual excede del objetivo de este tema, por lo que recomendamos dada unas especificaciones determinadas, recurrir a los catálogos de los fabricantes de circuitos integrados para determinar la configuración a utilizar en cada caso. Sirva como ejemplo las figuras 1.20 y 1.21 donde se muestran diversas configuraciones utilizando el regulador uA723.

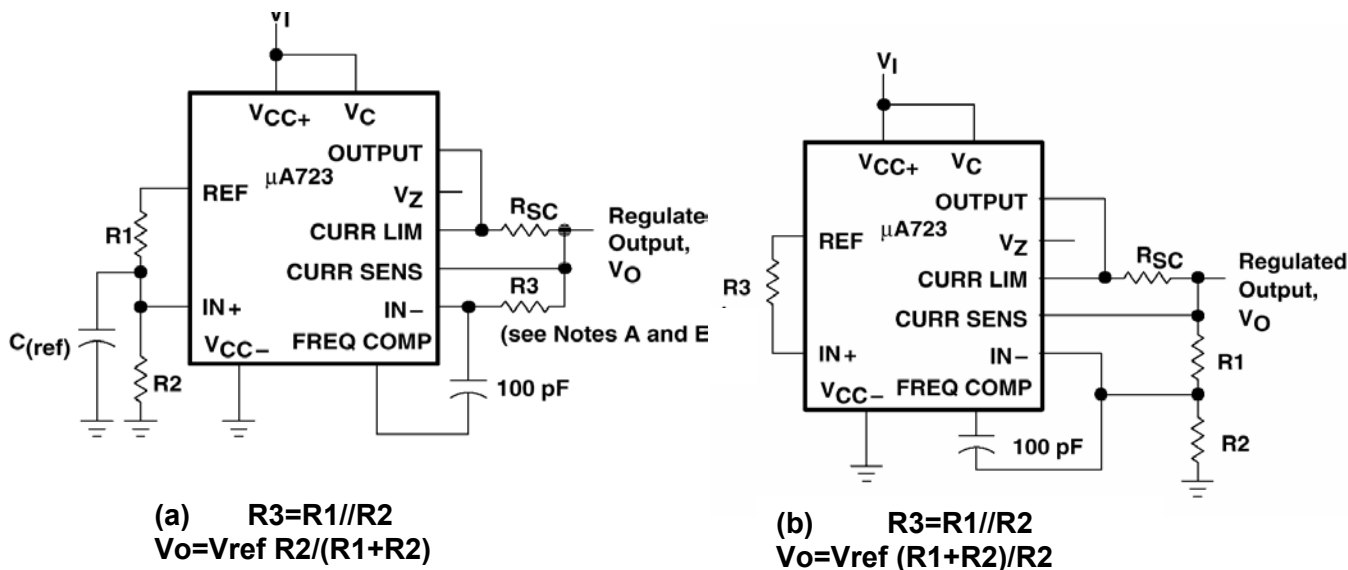


Figura 1.20. (a) Configuración básica para baja tensión ($V_0=2...7V$),
(b) Configuración para alta tensión ($V_0=7...37V$) (Cortesía de Texas Instrument)

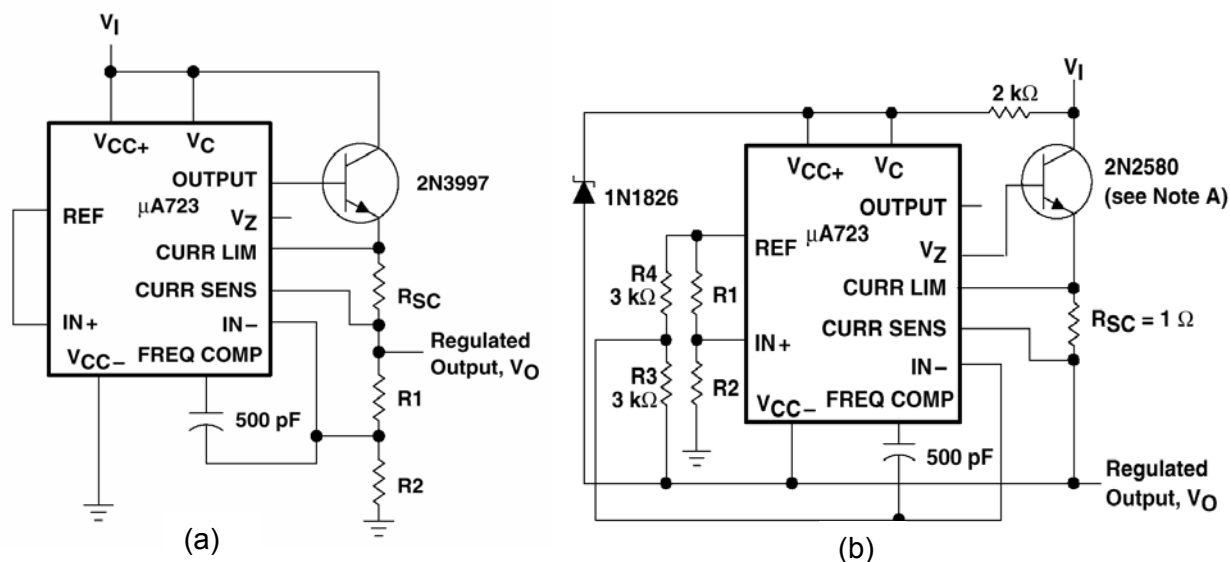


Figura 1.21. Configuraciones básicas del regulador uA723. (a) para tensión positiva ($V_0=7...37V$) con aumento de la corriente suministrada. (b) regulador positivo flotante ($V_0=4...250V$)

En la figura anterior 1.21a se muestra una configuración de un regulador positivo donde se aumenta la corriente capaz de suministrar. Para lo cual se recurre a un transistor externo, pues con solo el regulador integrado se puede entregar hasta 150mA. De esta manera, añadiendo un transistor externo la corriente máxima a suministrar viene fijada por el producto entre la corriente del regulador integrado con la ganancia en corriente hfe del transistor externo, obteniendo una tensión de salida:

$$V_o = V_{ref} \cdot \frac{R1 + R2}{R2}$$

Los reguladores de tensión integrados generalmente no admiten unas tensiones de entrada superiores a 40V, sin embargo utilizando la configuración mostrada en la figura 1.21b, como regulador flotante, donde el terminal Vcc- no se conecta a la masa, sino a un potencial

menos positivo que la tensión de entrada, de a lo sumo 40V. La alimentación del integrado viene impuesta por el diodo zener 1N1826 estando comprendida entre 9,5V y 40V. Para este montaje se obtiene una tensión de salida:

$$V_O = \frac{V_{ref}}{2} \cdot \frac{R_2 - R_1}{R_1}, \quad \text{con } R_3 = R_4$$

Los reguladores 78XX y 79XX.

Esta serie de reguladores corresponde a reguladores de tensión fija. Disponen de tres terminales: Entrada, salida y común de retorno. El símbolo XX de su numeración corresponde a la tensión de salida seleccionada, representando tensión positiva las 78 y tensión negativa los 79. La tolerancia de la tensión de salida está alrededor del 2 al 4% proporcionando desde 100mA hasta 1,5A.

Veamos sus configuraciones más habituales:

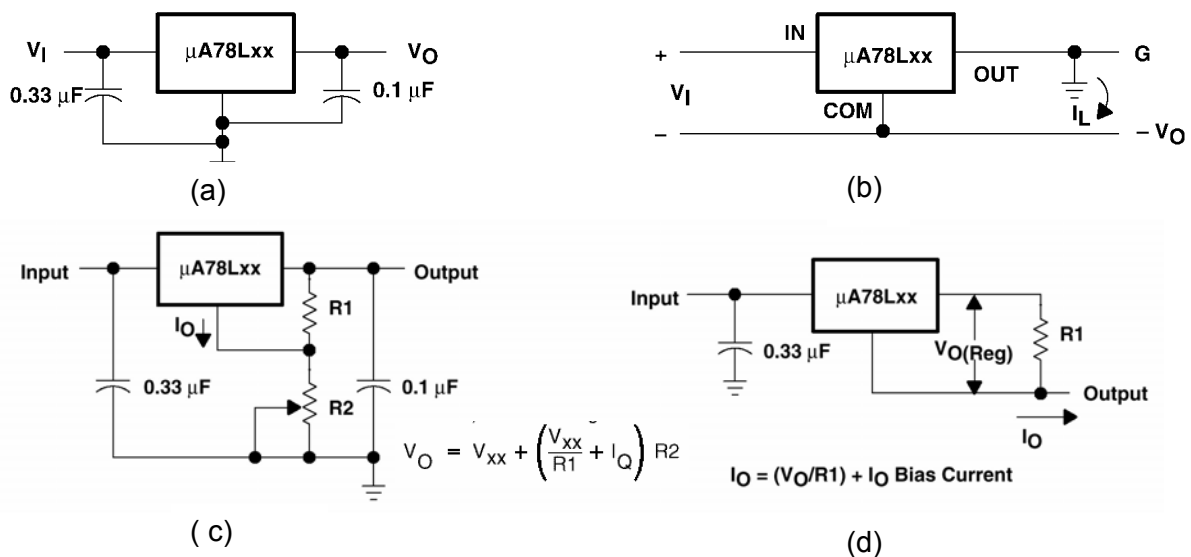


Figura 1.22. Diversas configuraciones de reguladores de tres terminales. (a) Regulador positivo fijo. (b) Regulador positivo utilizado en una configuración de tensión negativa (la tensión de entrada debe ser flotante). (c) Regulador de salida ajustable. (d) Regulador de corriente constante. (Cortesía de Texas Instrument)

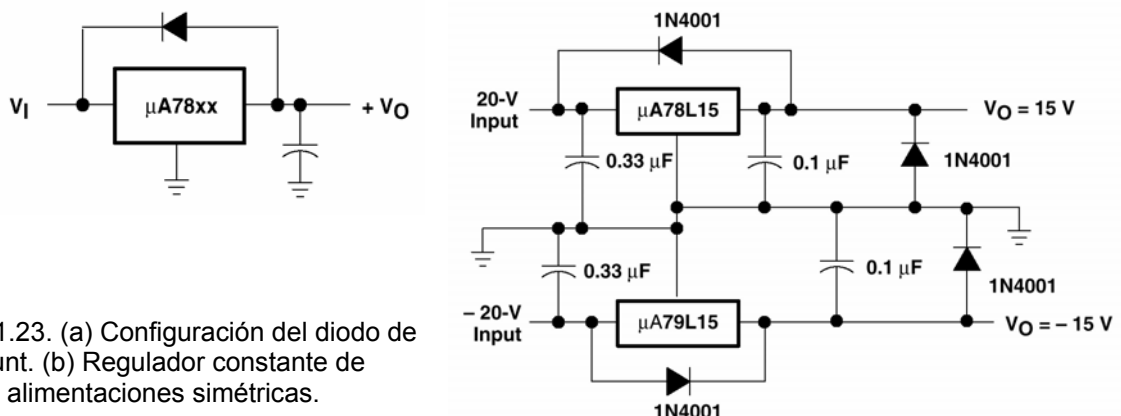


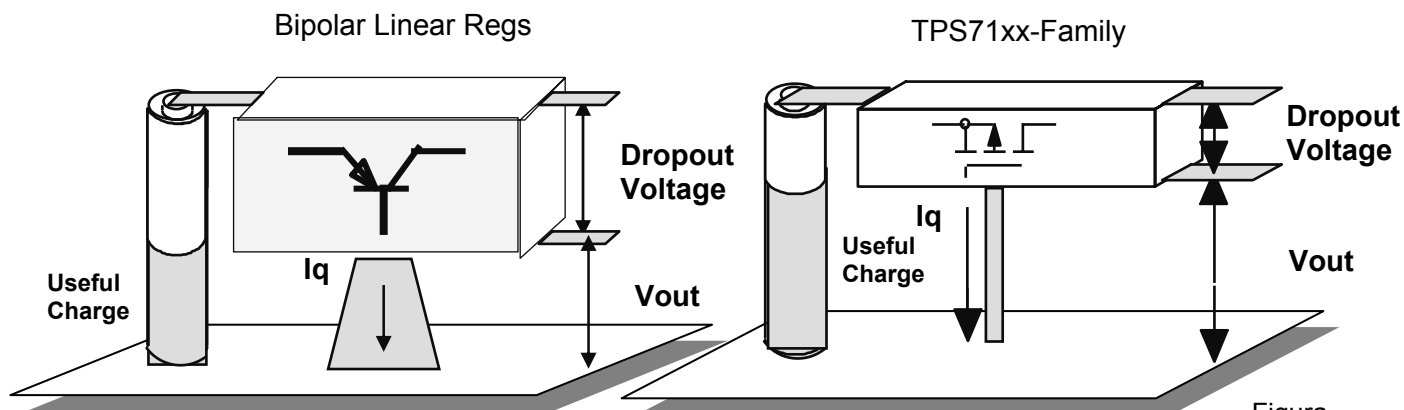
Figura 1.23. (a) Configuración del diodo de shunt. (b) Regulador constante de alimentaciones simétricas.

Ocasionalmente, existe la posibilidad de que la tensión de entrada del regulador se colapse más rápidamente que la de salida. Si la tensión de salida es aproximadamente 7V mayor, la unión base-emisor del transistor serie se puede destruir. Para prevenir esto se puede emplear un diodo, tal como se muestra a la figura 1.23.

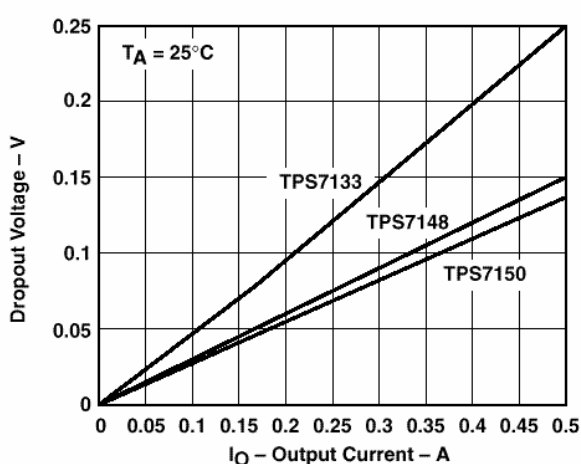
Como última familia, comentar la existencia de reguladores lineales de muy baja caída de tensión: LOW-DROPOUT VOLTAGE REGULATORS (LDOs). Veamos las características principales de una de las familias de LDOs.

Los reguladores TPS71XX.

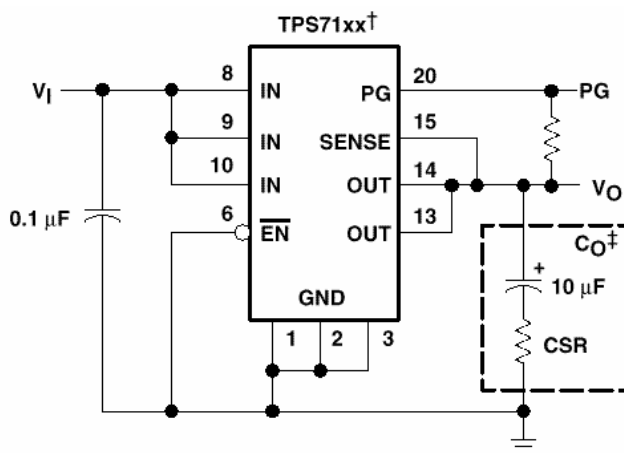
La reducción en un orden de magnitud de la caída de tensión y de la corriente de polarización interna se consigue gracias a reemplazar al típico transistor pnp con un transistor de tecnología PMOS. Así este componente se comporta como una resistencia de bajo valor (max de 32mV para I_{salida} de 100mA para el TPS7150), siendo directamente proporcional a la corriente de salida. Al utilizar un transistor de efecto de campo, este es controlado por tensión y la corriente de polarización es por tanto muy pequeña. (típica 285µA para todo el rango de corriente a la salida, 0mA a 500mA). Estas características imponen una mejora muy significativa para la vida media de los sistemas alimentados desde baterías. La familia LDO además incorpora como característica un modo de reposo, donde aplicando una señal TTL al pin ENABLE, apaga el regulador y reduce la corriente de polarización a 0,5µA máx. para $T_J = 25^\circ C$.



1.24. Comparación entre los reguladores lineales clásicos y los LDO



(a)



(b)

Figura 1.25. (a) Tensión de caída frente a la corriente de salida. (b) Configuración típica

Esta familia ofrece una salidas fijas de 3,3V, 4,85V y 5V, con una versión de tensión variable en el rango de 1,2V a 9,75V.

A modo de resumen veamos en la siguiente tabla las ventajas e inconvenientes más importantes de los reguladores lineales:

VENTAJAS	INCONVENIENTES
Simplicidad	Transformador aislamiento de baja frecuencia (50Hz).
Bajo coste para potencias $\leq 25W$.	Transistor en la región activa (resistencia variable) \Rightarrow Pérdidas elevadas.
Bajo EMI	Bajo rendimiento (30 - 50)%
Excelente regulación de línea y de carga (0,1%)	Baja densidad de Potencia. (0,5W/in ³)
Pequeño rizado tensión salida	
Rápidos tiempos de respuesta transitoria (20 μ s)	

1.5. Reguladores Conmutados.

De manera opuesta a los reguladores lineales, los reguladores o fuentes de alimentación conmutadas transforman un nivel de tensión continua no regulado en otro nivel regulado mediante un convertidor continua-continua, para lo cual se emplea semiconductores (normalmente un transistor y un diodo) trabajando en régimen de conmutación. Este modo de trabajo implica que el componente deberá cumplir las siguientes características:

- Tener dos estados claramente definidos, uno de alta impedancia (bloqueo) y otro de baja impedancia (conducción).
- Poder controlar el paso de un estado a otro con facilidad y con pequeña potencia de control.

De esta manera, la tensión de la red rectificada y filtrada, es "troceada" por el interruptor de estado sólido. Esta tensión alterna de alta frecuencia es modificada de nivel por un transformador de alta frecuencia con una mejor relación tamaño/potencia que en el caso de los reguladores lineales a 50Hz. Veamos a continuación un diagrama de bloques fundamentales de un regulador conmutado:

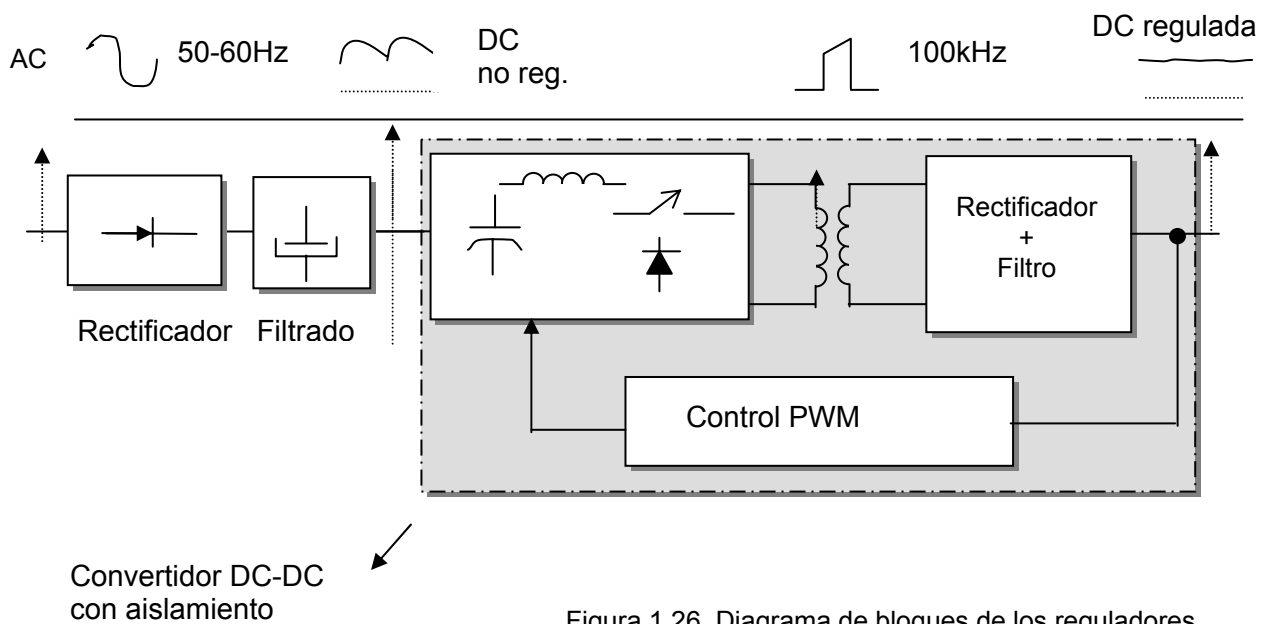


Figura 1.26. Diagrama de bloques de los reguladores conmutados

El funcionamiento de los convertidores de alimentación conmutados es relativamente sencillo de entender. A diferencia de los reguladores lineales, en los cuales el transistor trabaja en modo lineal, en los convertidores conmutados el transistor que gobierna la transferencia de energía entrada-salida trabaja en dos modos diferenciados: en saturación o en corte. Esta diferencia fundamental se materializa en que en el regulador lineal existe un flujo de corriente continuo desde la entrada a la salida para mantener una carga a tensión constante. Mientras que en los convertidores conmutados también se regula el mismo flujo de corriente pero troceando la tensión de entrada y controlando la corriente media, gracias al control del ciclo de trabajo del transistor. En este caso una vez que la tensión de entrada se ha convertido en una tensión alterna de tipo rectangular, su amplitud puede ser modificada gracias a la acción de un transformador, que además puede proporcionar varias salidas. Destacar que además el transformador es de alta frecuencia, lo cual implicará una reducción del tamaño y peso del convertidor. Por último antes de que esta tensión transformada llegue a la carga, deberá ser filtrada para proporcionar una tensión continua estabilizada.

Las mayores ventajas e inconvenientes pueden ser resumidas en la siguiente tabla:

VENTAJAS	INCONVENIENTES
Transistor en conmutación \Rightarrow Mayor rendimiento (60-90)%	Mayor Complejidad.
Mayor tolerancia a las variaciones de línea.	Emisión interferencias electromagnéticas (EMI).
Mayor densidad de potencia (15W/in ³)	Peor regulación de línea y de carga
Posibilidad de varias salidas independientes.	Peor tiempos de respuesta transitoria (300 μ s)
Transformador de alta frecuencia \Rightarrow reducción tamaño y peso.	Elevado PARD (Periodic and Random Deviation) \Rightarrow Elevado rizado y ruido.

PLD (Power Line Disturbance): Test de pruebas repetitivas de la fuente ante tensiones de entrada superiores e inferiores a las nominales durante un tiempo establecido y con un ciclo de repetición dado.

pe.: Sub-tensión: <20%, 2s, 10 veces / ciclo.
Sobre-tensión: >15%, 1s, 10 veces / ciclo.

PLT (Power Line Transient) Test de inyección de sobretensiones a la red con una cadencia determinada y un nº determinado de veces, con el que se determina la capacidad de soportar esas sobretensiones.

pe.: 150% $V_{\text{máx-linea}}$, 150 μs , 100 veces durante 3 segundos

SALIDA:

Tensiones y corrientes:

Valores nominales y rangos.

Tensión de Salida V_{out}	Mínima Corriente Continua $I_{\text{out}}(\text{min})$	Máxima Corriente Continua $I_{\text{out}}(\text{rated})$
+ 5,0V \pm 0,5%	0,30A	4,50A
+ 36,0V \pm 1%	0,00A	1,50A

Regulación: desviación máx. permitida en % de la tensión de salida sobre el valor nominal para distintas variaciones:

Regulación de Línea Cambio de la tensión de salida en respuesta a cambios de la tensión de entrada, medido para la máxima corriente de salida (pe.: 0,05% de V_o -máx. para cambios de la línea entre el máximo y el mínimo).

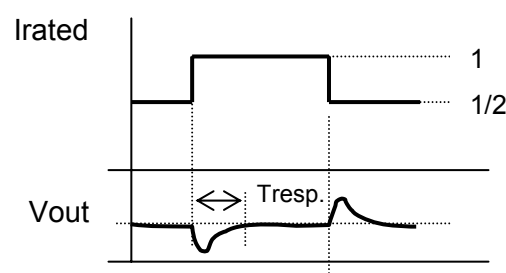
$$RL : \frac{V_{o(\text{máx-input})} - V_{o(\text{mín-input})}}{V_{o(\text{nominal-input})}} \cdot 100 \%$$

Regulación de Carga Cambio de la tensión de salida en respuesta al cambio de la corriente de carga, medido a la tensión de entrada nominal (pe.: 0.05% de V_o -máx. desde el 50% al 100% de carga.)

$$RC : \frac{V_{o(\text{máx-carga})} - V_{o(\text{media-carga})}}{V_{o(\text{máx-carga})}} \cdot 100 \%$$

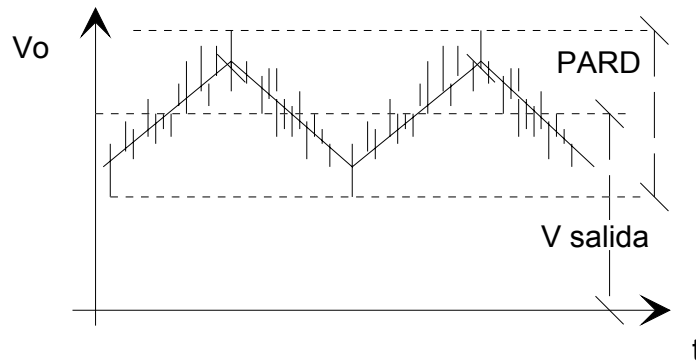
Regulación cruzada Es el % de la máxima variación de tensión en una salida al variar la carga en otra salida, dentro del rango de variación.

Tiempo de Respuesta Dinámica de la Carga: Representa el tiempo que el sistema de realimentación tarda en reaccionar ante un salto de carga para volver al estado estacionario de la tensión de salida.



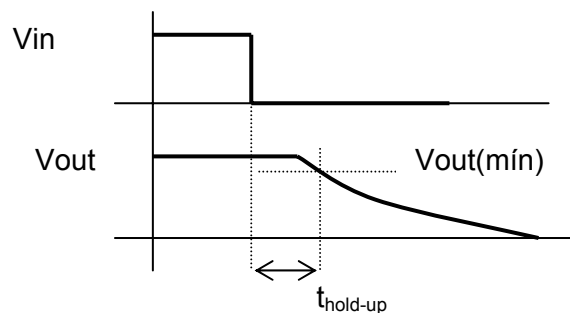
El tiempo y la forma de la respuesta proporciona una indicación del error estacionario (Ganancia DC del E/A) y de la compensación de frecuencia.

PARD: (Periodic and Random Deviation) Es la suma de todo rizado y ruido medido sobre una banda de frecuencias establecida y especificado en su valor de peak-to-peak o rms.



Tiempo de encendido: (Warm-Up Time) Tiempo desde el encendido hasta disponer de las salidas reguladas con capacidad de máxima corriente (pe.: 200ms)

Tiempo de mantenimiento: (Hold-up time) Representa el intervalo de tiempo durante el cual la salida puede proporcionar la máxima potencia después de haber suprimido la tensión de entrada. Los requisitos dictados por este test indican la cantidad de energía que deben de almacenar los condensadores del filtro de entrada.

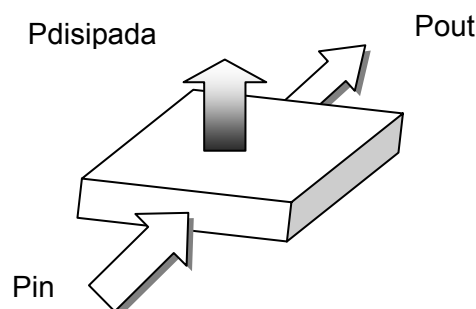


Overload Protection: Característica de la salida que limita la corriente de salida bajo condiciones de cambios de carga, de manera que no resulte dañado el conversor.

Rendimiento: (Efficiency) Determina que cantidad de calor será generado en el convertidor. Normalmente se especifica para máxima carga y tensión de entrada nominal.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100 \text{ (\%)}$$

La cantidad de potencia de entrada convertida en calor es función del rendimiento.



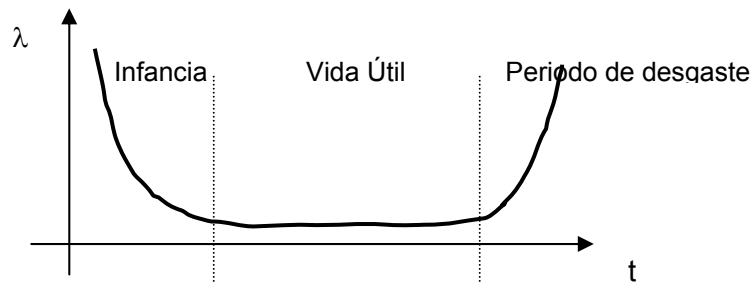
$$P_{disipada} = P_{out} \cdot \left[\frac{1-\eta}{\eta} \right]$$

OTRAS:

Rangos de Temperatura, Humedad, Resistencia a vibraciones, Fijaciones, Tipo de acabado, etc.

Datos físicos: Tamaño, peso.

Fiabilidad y MTBF: (Mean Time Before Failure). El ratio de fallos de un convertidor se puede representar en la siguiente figura.



Durante el periodo de vida útil, la fiabilidad del equipo se mide mediante el MTBF. El MTBF se puede establecer de dos maneras: mediante estadísticas reales de horas de funcionamiento de una gran población, o mediante cálculos establecidos por normativas, tales como la MIL-HDBK-217.

El ratio de fallos, λ, y el MTBF están relacionados por : $MTBF = \frac{1}{\lambda}$, definiendo la

fiabilidad como: $R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-\frac{t}{MTBF}}$,

t	2,0	1,0	0,5	0,1	0,01
R(t)	0,135	0,37	0,61	0,90	0,99

Así si un convertidor funciona durante un tiempo igual a su MTBF, la probabilidad de supervivencia es del 0,37. Cuando esté funcionando un tiempo igual al 10% del MTBF, el conversor tendrá un 0,90 de supervivencia.

(pe.: MTBF = 75.000 Horas de funcionamiento continuo.)

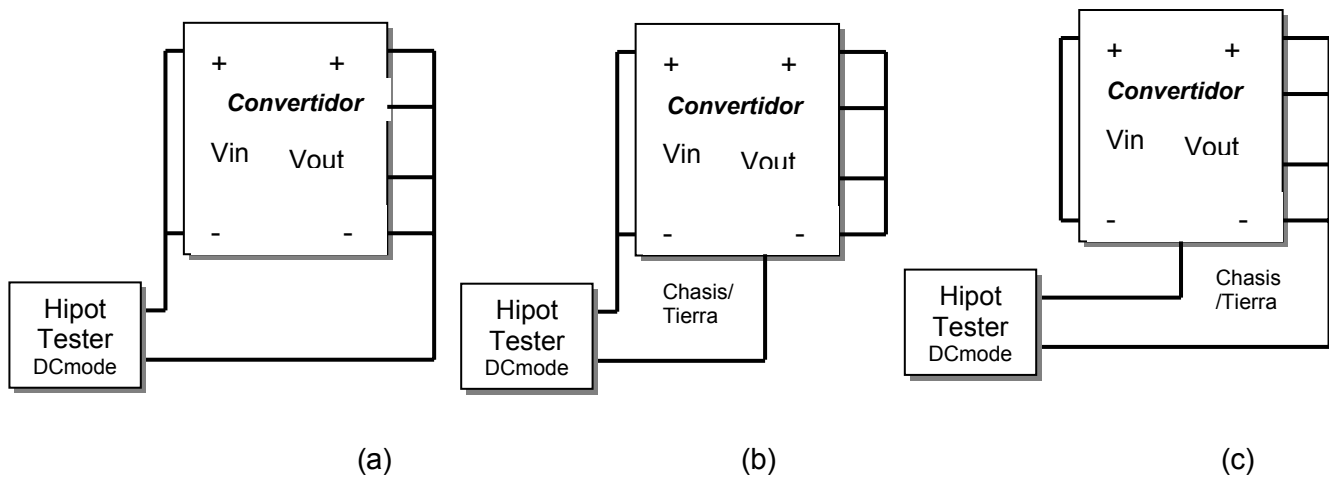
Seguridad: (SAFETY) Para equipos electrónicos Seguridad significa que el producto no presente descargas eléctricas o peligro mecánico para las personas que las utilicen y que proporcione un razonable grado de seguridad a las personas que los reparen. Como un breve apunte, existen exigencias a cerca de:

Resistencia al fuego: Los componentes del convertidor no deben de actuar como activador de la llama.

Caja soporte (enclosure): Proporciona el primer nivel de protección. Debe de estar construida de aislante o si es metálica, deberá estar conectada a tierra con una resistencia menor de 0.1Ω cuando se le hagan pasar 25A desde su superficie a tierra.

Aislamientos:

Entrada- Salida	3000V _{rms} (a)
Entrada - Tierra	1500V _{rms} (b)
Salida - Tierra	500V _{rms} (c)



Tipos de Componentes, Cableados...

Documentación:

- Esquemas eléctricos. -Disposición de componentes y lista de componentes. - Test. -Teoría del funcionamiento.
- Protocolos de puesta en marcha y de reparación.

Tema 1: Introducción.....	1
1.1.- Los Sistemas de Potencia.....	1
1.2.- Los Convertidores de Alimentación.....	3
1.2.1. Rectificación.....	4
1.2.2. Filtrado.....	6
1.3. Fuentes de alimentación reguladas.....	9
1.3.1. Estabilización de tensión.....	10
1.3.2. Reguladores de tensión.....	11
1.4.- Reguladores lineales.....	13
1.4.1. Reguladores de Tensión Integrados.....	16
1.5. Reguladores Conmutados.....	21
1.6.- Especificaciones.....	23

OBJETIVOS:

Convertidores de Alimentación:

- Comprender y analizar el funcionamiento de los rectificadores: media-onda y onda-completa con y sin toma intermedia.
- Describir el papel del Condensador de filtrado y calcular V_m , V_{dcm} , $V_r(pp)$, V_{DC} y $V_{dc(mín)}$.
- Definir Factor de forma y rizado de salida.
- Fuentes de Alimentación Reguladas y No Reguladas.
- Circuitos Estabilizadores de tensión. Montaje con zener y con transistor.
- Reguladores de tensión. Lineales y conmutados.
- Reguladores Lineales: Serie y paralelo.
- Reguladores Lineales integrados.
- Reguladores Conmutados: Características básicas.
- Especificaciones de una Fuente de Alimentación.